

Radiómetros en ondas milimétricas del experimento QUIJOTE

Eduardo Artal Latorre, Beatriz Aja Abelán, Juan Luis Cano de Diego, Luisa de la Fuente Rodríguez, Angel Mediavilla Sánchez, José Vicente Terán Collantes, Enrique Villa Benito
artale@unican.es, ajab@unican.es, juanluis.cano@unican.es, fuenterm@unican.es,
angel.mediavilla@unican.es, teranjv@unican.es, villae@unican.es

Departamento de Ingeniería de Comunicaciones. Universidad de Cantabria. Edificio Ingeniería de Telecomunicación. Plaza de la Ciencia s/n, 39005 Santander.

Abstract- The radiometers at 30 and 40 GHz for the QUIJOTE radio astronomy experiment are broadband very sensitive receivers to perform scientific sky observations of the Cosmic Microwave Background (CMB). The aim of the QUIJOTE experiment is the measurement of the linear polarization percentage of the received signal. Scientific data will be used for cosmological analysis of the Universe and the indirect detection of gravitational waves. The radiometers are based on cryogenically cooled front-end modules followed by room temperature amplification, correlation and detection modules. Relative bandwidth is around 30%. The radiometers scheme is based on two balanced branches and direct detection.

I. INTRODUCCIÓN

El experimento QUIJOTE CMB (del inglés Q-U-I JOint TEnerife CMB experiment) es una colaboración científica entre el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) en Tenerife, el Instituto de Física de Cantabria y el Departamento de Ingeniería de Comunicaciones de la Universidad de Cantabria en Santander, el Observatorio Jodrell Bank en Manchester (Reino Unido), el Cavendish Laboratory en Cambridge (Reino Unido) y la compañía española IDOM [1]. Consiste en dos telescopios y tres instrumentos dedicados a la medida de la polarización de la señal recibida del cielo proveniente de la radiación del Fondo Cósmico de Microondas (FCM), en inglés Cosmic Microwave Background (CMB), en el rango de frecuencias comprendido entre 10 GHz y 47 GHz, con objeto de caracterizar la polarización del FCM y otros procesos de emisión galáctica y extra-galáctica con grandes escalas de resolución (alrededor de 1 grado).

El primer instrumento, Multi-Frequency Instrument (MFI) es multifrecuencia, con un total de 8 canales centrados en cada una de las cuatro frecuencias: 11, 13, 17 y 19 GHz. Actualmente el primer telescopio y el primer instrumento están en operación en el Observatorio del Teide.

El segundo instrumento de QUIJOTE, que consta de 30 receptores a 30 GHz, ha sido diseñado para alcanzar la sensibilidad necesaria para detectar una componente de ondas gravitacionales primordial si ésta tuviera una razón tensorial a escalar de 0.1. Dicha componente de ondas gravitatorias deja su impronta en el espectro de potencias de la polarización del FCM en forma de los denominados “modos-B”. La detección de dichos modos-B con esa amplitud abriría un camino inédito hasta el momento para esclarecer la física de la época de inflación. Este segundo instrumento, Thirty GHz Instrument (TGI) está en fase de integración en el observatorio.

La segunda fase de QUIJOTE consiste en la construcción de un segundo telescopio y un tercer instrumento a 40 GHz Forty GHz Instrument (FGI), también con 30 receptores. Esta segunda fase está financiada en su totalidad por el proyecto Consolider 2010 "Exploring the Physics of Inflation (EPI)" [2]. El segundo telescopio ha sido ya instalado en el Observatorio del Teide y el FGI se encuentra en fabricación. La Fig. 1 muestra una vista de los dos telescopios instalados.



Fig. 1. Los dos telescopios de QUIJOTE instalados en el Observatorio del Teide (Fuente: IAC, junio de 2015).

II. RADIÓMETROS

Los receptores de QUIJOTE son radiómetros polarímetros de tipo correlación, ya que deben medir la polarización de las ondas recibidas desde el cielo. Las señales son captadas por el telescopio [3], construido según un esquema Gregoriano Dragon offset formado por un reflectores parabólicos fuera de eje: primario de 2.25 m y secundario de 1.85 m. El telescopio está diseñado para proporcionar una baja polarización cruzada y un haz de radiación simétrico. El sistema está sub-iluminado para minimizar los lóbulos laterales y la influencia de la radiación de la Tierra.

Los receptores de 30 GHz y los de 40 GHz están contruidos según un esquema casi idéntico [4]. En la Fig. 2 se muestra el de 30 GHz, que consiste en un frontal de muy bajo ruido, Front-End Module (FEM), enfriado a la temperatura criogénica de 20 K, seguido del módulo posterior, Back-End Module (BEM) que opera a temperatura ambiente en torno a unos 298 K. Los componentes pasivos previos al FEM, bocina (feedhorn), polarizador (polarizer) y transductor ortomodo (OMT) están en la parte fría para minimizar su contribución al ruido total del receptor.

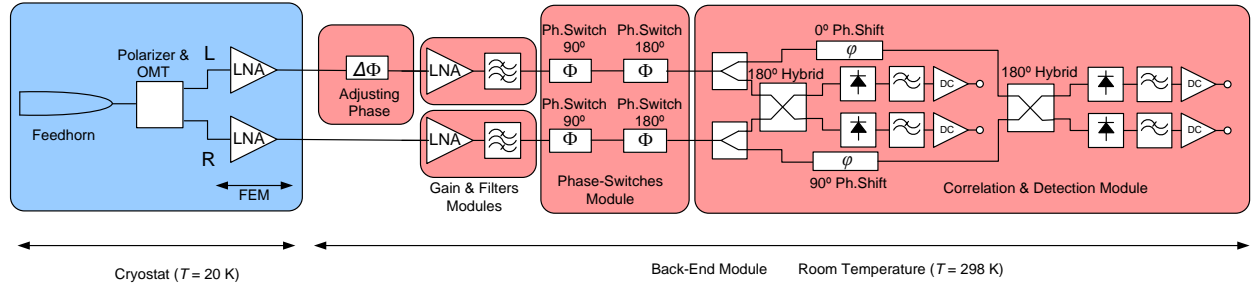


Fig. 2. Esquema de un receptor del instrumento TGI (30 GHz).

El conjunto del polarizador y OMT da a su salida dos señales, que son proporcionales a las componentes de polarización circular a izquierdas (L) y a derechas (R) de la señal captada por la bocina. Estas dos señales se amplifican y se filtran en dos ramas separadas, que idealmente deben tener idéntica respuesta de amplitud y fase. El ajuste fino del equilibrio de la respuesta en fase se realiza con un componente de ajuste en fase (Adjusting Phase en la Fig. 2).

La correlación de las señales, y su detección directa a baja frecuencia, se realiza en el módulo de Correlación-Detección del BEM. Para poder corregir los errores sistemáticos del receptor, se realiza una modulación de fase de las señales antes de efectuar su correlación. Esta modulación de fase se hace con el módulo de conmutadores de fase (Phase-Switches Module), formado por dos ramas idénticas con conmutadores de fase de banda ancha de 180° y de 90°.

La correlación consiste básicamente en hacer sumas y restas de las señales de microondas, mediante un sistema basado en acopladores híbridos de 3 dB/90° ó de 3 dB/180° y un desfaseador fijo de 90° de banda ancha en una de las ramas. Según cual sea el estado de los conmutadores de fase, de los cuatro posibles estados (0°, 90°, 180° y 270°), las señales detectadas de salida del módulo de Correlación-Detección son proporcionales a distintas combinaciones de los parámetros de Stokes (Q, U, I), que definen el grado de polarización de una onda electromagnética y son las magnitudes a obtener a partir de las observaciones.

III. PRINCIPIO DE OPERACIÓN

Los parámetros de Stokes se obtienen a partir de las componentes de campo eléctrico de polarización circular a izquierdas y a derechas. Se deben usar valores normalizados de amplitud de los campos, dado que los parámetros de Stokes tienen su amplitud comprendida entre cero y uno. La matriz de parámetros de Stokes es la mostrada en (1). El subíndice “l” corresponde a la componente a izquierdas y el subíndice “r” al de la componente a derechas.

$$\begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} |E_l|^2 + |E_r|^2 \\ 2 \operatorname{Re}(E_l^* E_r) \\ -2 \operatorname{Im}(E_l^* E_r) \end{pmatrix} \quad (1)$$

Un diagrama de bloques simplificado del receptor de 30 GHz es el que se muestra en Fig. 3, donde no se incluyen los amplificadores de bajo ruido del FEM y del BEM, ni los detectores y los amplificadores DC a la salida.

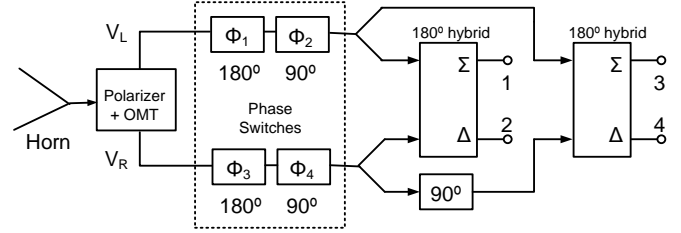


Fig. 3. Diagrama de bloques simplificado de un radiómetro del instrumento de 30 GHz (TGI).

Llamando Φ a la diferencia de fase entre la rama superior y la inferior, se pueden calcular los parámetros de Stokes a partir de los voltajes de las señales de salida una vez detectadas y amplificadas (V_{di} con $i = 1, 2, 3, 4$). Los cálculos que permiten obtener los parámetros de Stokes se indican en la Tabla 1 de forma resumida.

TABLA 1

Obtención de los parámetros de Stokes a partir de las tensiones de salida detectadas (valores normalizados).

Φ	I	Q	U
0°	$V_{d1} + V_{d2} = V_{d3} + V_{d4}$	$V_{d1} - V_{d2}$	$V_{d3} - V_{d4}$
90°	$V_{d1} + V_{d2} = V_{d3} + V_{d4}$	$V_{d3} - V_{d4}$	$V_{d2} - V_{d1}$
180°	$V_{d1} + V_{d2} = V_{d3} + V_{d4}$	$V_{d2} - V_{d1}$	$V_{d4} - V_{d3}$
270°	$V_{d1} + V_{d2} = V_{d3} + V_{d4}$	$V_{d4} - V_{d3}$	$V_{d1} - V_{d2}$

Como se deduce de esta tabla, el valor del parámetro I de Stokes, que indica la intensidad de la onda recibida, se puede calcular a la vez de la combinación de dos tensiones de salidas distintas. Un método alternativo de cálculo de los parámetros de Stokes es a partir de los conjuntos de valores de tensión de una sola salida, obtenidos en sucesivos cambios de estado de fase de los conmutadores de fase. La caracterización de los errores sistemáticos, para la corrección de los datos medidos, difiere según se utilice uno u otro método de cálculo.

IV. RECEPTORES DE 30 GHz (TGI)

La banda nominal de los receptores de 30 GHz del instrumento TGI cubre de 26 a 36 GHz (32.2% de ancho de banda relativo). En dicha banda, las características principales de los componentes pasivos, optomecánica previa al FEM, construidos con tecnología de guías de onda y medidos a temperatura ambiente, son:

Antena de bocina corrugada:

Pérdidas de retorno > 22 dB

Directividad > 20 dB

Polarización cruzada < -40 dB

Polarizador (desfase de 90° entre dos modos ortogonales):

Pérdidas de retorno > 25 dB

Pérdidas de inserción < 0.2 dB

Desfase entre modos TE₁₀ y TE₀₁ = 90° ± 1°

Transductor Ortomodo (con salidas en fase):

Pérdidas de retorno > 25 dB

Pérdidas de inserción < 0.15 dB

Aislamiento entre salidas ≈ 50 dB

Diferencia de fase entre salidas = 1° ± 0.5°

Los amplificadores criogénicos de bajo ruido, situados en el FEM, son un componente crítico en los receptores, ya que determinan en buena medida la temperatura de ruido del receptor completo y de ahí su sensibilidad. Los valores promedio, obtenidos de las medidas criogénicas de 62 unidades a 12 K, han dado los siguientes resultados de 26 a 36 GHz:

Temperatura de ruido < 27 K (típico ≈ 25 K)

Ganancia > 40 dB

La Fig. 4 muestra los resultados de temperatura de ruido y ganancia, de la medida a temperatura criogénica (12 K) de las 62 unidades de los amplificadores criogénicos del FEM.

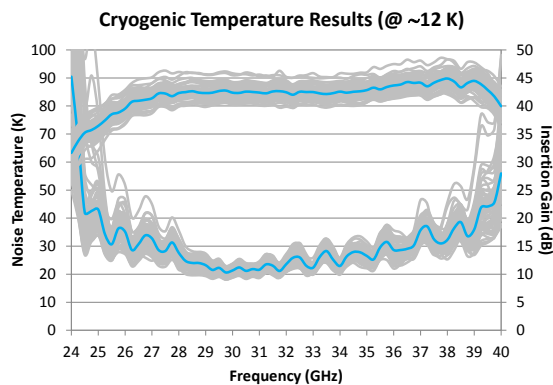


Fig. 4. Resultados de temperatura de ruido y ganancia de la medida de 62 unidades del amplificador criogénico del TGI.

La integración de los 30 radiómetros se realizó en las instalaciones del IAC (Tenerife). La Fig. 5 muestra una vista parcial de los módulos frontales (FEM) antes de ser introducidos en el criostato. Los 30 conjuntos de la optomecánica junto con los amplificadores criogénicos para los 30 receptores (30 píxeles) se alojaron en el interior del criostato del TGI para su enfriamiento.

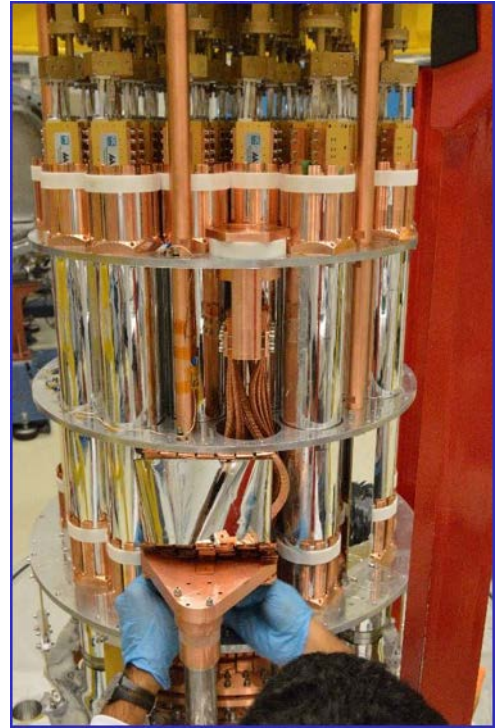


Fig. 5. Vista parcial de la integración de los módulos frontales de los receptores de 30 GHz.

En la imagen de la Fig. 6 se ve el aspecto general del criostato en la sala de montaje, integración y verificación del IAC, antes de su instalación en el Observatorio del Teide.

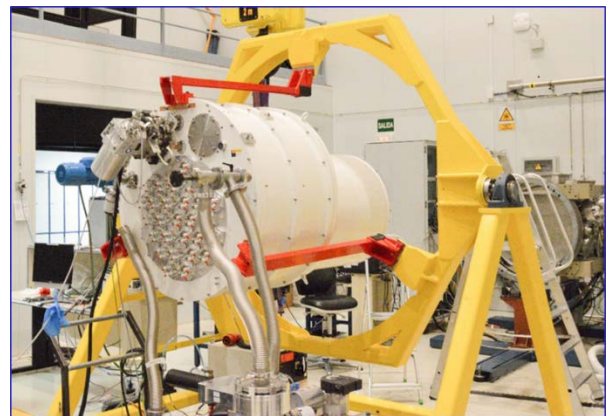


Fig. 6. Vista general del criostato del TGI (30 GHz) en la sala de montaje, integración y verificación del IAC.

El módulo posterior (BEM) de cada receptor, operado a temperatura ambiente, está compuesto por dos amplificadores de bajo ruido (RF Gain Module), de unos 35 dB de ganancia, seguidos del módulo de los conmutadores de fase (Phase-Switches Module) y del módulo de Correlación-Detección (Correlation & Detection Module). En la Fig. 7 se ve el conjunto de estos subsistemas para un pixel del TGI.

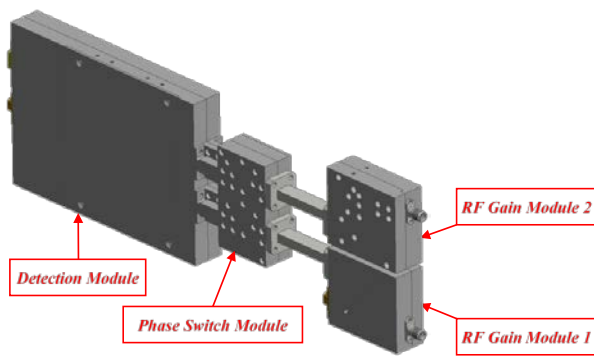


Fig. 7. Conjunto del BEM para un pixel del TGI

Los BEM de los 30 receptores del instrumento TGI se han integrado en dos racks idénticos. Los racks son normalizados de 19 pulgadas y 3 unidades de altura. Cada uno aloja los subsistemas del BEM para 16 píxeles. La conexión de las señales de microondas desde la salida del criostato, etapas frías del FEM, hasta las entradas del BEM, se realiza con cables coaxiales apareados en fase. La fotografía de la Fig. 8 muestra un rack del BEM del TGI.

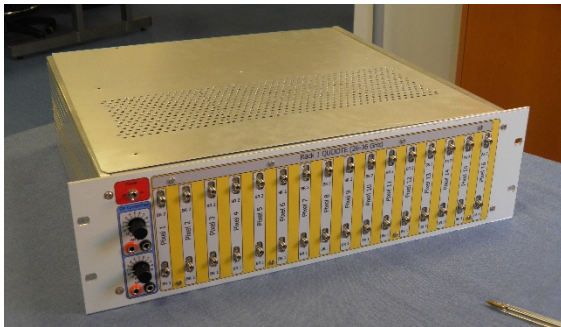


Fig. 8. Rack de 19 pulgadas del BEM del instrumento TGI conteniendo subsistemas para 16 píxeles.

Las señales de salida de los radiómetros se conectan a la entrada del sistema de adquisición de datos, que es un equipo desarrollado en el IAC. En el panel posterior del rack del BEM hay distintos conectores multicontacto, para introducir las señales TTL de control de los conmutadores de fase y extraer las señales de salida de cada píxel. Además se accede a los potenciómetros de control de las ganancias de los amplificadores DC de post-detección. Se presenta en la Fig. 9 una vista del panel posterior del rack.

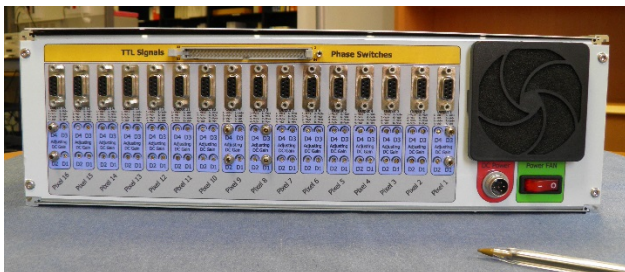


Fig. 9. Vista del panel posterior del rack del BEM para el instrumento TGI.

V. RECEPTORES DE 40 GHz (FGI)

Los receptores de 40 GHz cubren la banda nominal de 35 a 47 GHz (29.3% de ancho de banda relativo). El esquema del radiómetro de 40 GHz es casi idéntico al del radiómetro de 30 GHz. Solamente difieren en el tipo de híbrido de 3 dB del

módulo de Correlación-Detección, que es del tipo 3dB/ 90° en el de 40 GHz, en lugar del tipo 3dB/180°.

Los prototipos de los subsistemas de los radiómetros de 40 GHz se han diseñado y validado. Los distintos módulos de los receptores de 40 GHz están en fase de fabricación en serie para su posterior integración en el instrumento FGI. Como ejemplo, las gráficas de la Fig. 10 indican los valores típicos de ruido y ganancia de los amplificadores criogénicos del FGI.

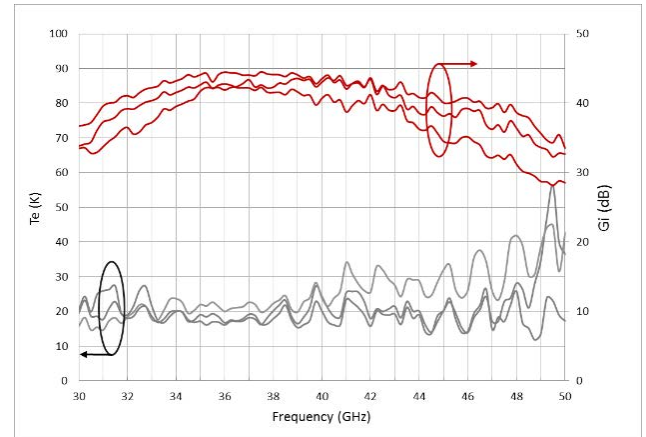


Fig. 10. Resultados de temperatura de ruido y ganancia de la medida de 3 unidades del amplificador criogénico del FGI.

VI. CONCLUSIONES

Los instrumentos de 30 y 40 GHz (TGI y FGI) del experimento QUIJOTE consisten en 30 receptores para cada banda. Son radiómetros de tipo polarímetro, para obtener medidas de la polarización de las ondas provenientes del fondo cósmico de microondas. Ambos instrumentos se están instalando en el Observatorio del Teide (Tenerife).

AGRADECIMIENTOS

Los desarrollos de los receptores se han financiado con ayudas del Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación, del Ministerio de Economía y Competitividad, cuyas referencias son: CONSOLIDER CSD2010-00064, AYA2010-21766-C03-03, AYA2012-39475-C02-02 y el programa de investigación FPI BES2011-046199. Los autores agradecen a Eva María Cuerno la cuidadosa fabricación y montaje de los circuitos.

REFERENCIAS

- [1] R. Génova-Santos, J. A. Rubiño-Martín, R. Rebolo, M. Aguiar et al. "The QUIJOTE experiment: Project overview and first results", *Highlights os Spanish Astrophysics VIII, Proceedings of the XI Scientific Meeting of the Spanish Astronomical Society*, Teruel, September 2014.
- [2] <http://www.epi-consolider.es/>
- [3] A. Gomez, G. Murga, B. Etzeita, R. Sanquirce, R. Rebolo, et al. "QUIJOTE telescope design and fabrication", *Proc. SPIE 7733, Ground-based and Airborne Telescopes III*, 77330Z (July 28, 2010); doi:10.1117/12.857286.
- [4] E. Villa, J.L. Cano, J. Cagigas, F.J. Casas, A.R. Pérez, B. Aja, J.V. Terán, L. de la Fuente, E. Artal, R. Hoyland, A. Mediavilla, "The thirty gigahertz instrument receiver for the Q-U-I Joint Tenerife experiment: Concept and experimental results", *Review of Scientific Instruments* 86, 024702 (2015); doi: 10.1063/1.4907015